



УДК 658.261

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА БГУ-100

EXERGETIC ANALYSIS OF THE BIOGAS PLANT BASED ON WASTE LIVESTOCK WASTE BGU-100

Есаулкова Юлия Сергеевна, магистрант каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: esyuli@yandex.ru

Арбузова Елена Валерьевна, ст. преподаватель каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: mureva82@mail.ru

Велькин Владимир Иванович, канд. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.i.velkin@urfu.ru

Julia S. Esaulkova, Master student, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: esyuli@yandex.ru

Elena V. Arbuzova, senior teacher of the department. "Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: mureva82@mail.ru

Vladimir I. Velkin, candidate Tech. Sci., Associate Professor. "Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.i.velkin@urfu.ru

Аннотация: В результате эксергетического анализа БГУ-100 были выявлены наиболее слабые, с точки зрения эффективности, звенья и предложены пути усовершенствования процесса. Эксергетический коэффициент полезного действия более показателен, чем энергетический, так как учитывает как свойства самой системы, так и окружающей среды. Показано, что в работе БГУ-100 при всех благоприятных условиях тепловой коэффициент полезного действия может достигнуть 0,91.

Abstract: As a result of the exergy analysis of the BSU-100, the weakest, from the point of view of effectiveness, links were identified and ways of improving the process were suggested. The exergic efficiency is more revealing than the energy efficiency, since it takes into account both the properties of the system itself and the environment. When the BSU-100 operates under all favorable conditions, thermal efficiency reaches 0.91.

Ключевые слова: биогазовые установки; эксергетический баланс; эффективность; субстрат; биогаз.

Key words: biogas plants; exergy balance; efficiency; substrate; biogas.

ВВЕДЕНИЕ

В России главной причиной ограниченного применения биогазовых технологий являются большие энергозатраты на технологические нужды оборудования, при этом следует отметить, что основные энергетические потери возникают в метантенке (до 60% выделившегося биогаза используется установкой для собственных нужд) [1]. В связи с этим существует необходимость усовершенствования и уточнения теоретических методов анализа эффективности различных энергетических процессов работы биогазовых установок (БГУ) и составления на их основе методик расчета и проектирования высокоэффективного биогазового оборудования.

Наиболее перспективным для этих целей является эксергетический метод анализа, основанный на термодинамической функции, учитывающей как свойства самой системы, так и окружающей среды [2].

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БГУ

Подсчет входных и выходных продуктов от БГУ позволяет оценить притоки и оттоки эксергии в определенных границах системы (рис.1) [2]. Расход электроэнергии на собственные нужды составляет примерно 20 кВт·ч/сут, тем самым годовой расход электроэнергии равен 7,30 МВт·ч. При обычной работе установки навоз разбавляется рекуперативной водой в объеме 1,4 т/сут, для

повышения влажности субстрата до 92%, 6,5 кг/с - сетевая вода.

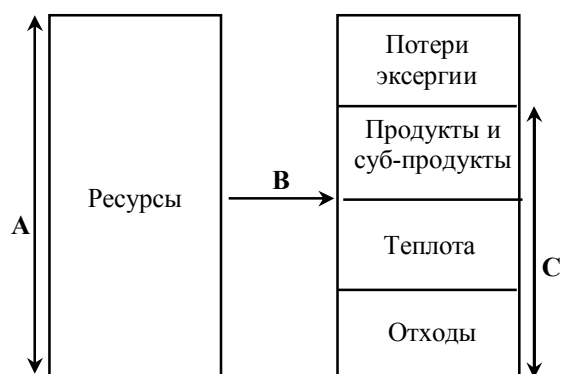


Рис. 1. Схема эксергетического баланса установки:

А – Эксергия на входе в энергетическую установку; В – Эксергетическая эффективность; С – Эксергия на выходе из установки.

Таким образом, расход воды за год 205495 м³/год. Общее производство CO₂ от производства биогаза, находится из условия, что биогаз содержит примерно 35% CO₂, и составляет около 12775 м³/год. Данные по балансу энергии представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Исходные данные для эксергетического баланса

| Продукты на входе БГУ | |
|------------------------|----------------------------|
| Субстрат | 2350 т/год |
| Электроэнергия | 7,30 МВт·ч |
| Вода | 205495 м ³ /год |
| Продукты на выходе БГУ | |
| Биогаз | 36500 м ³ /год |
| Биоудобрения | 506 т/год |
| CO ₂ | 12775 м ³ /год |

Рассматриваемая БГУ-100 находится в г. Сафонове, Смоленской области.

В расчете химической эксергии входного субстрата будут участвовать следующие химические элементы - С, Н, N, Р, К (Cl, Ca, Si, Al и Mg доступны только в небольших количествах, а также имеют очень низкую эксергию) [2]:

$$E_{\text{хим.суб.}} = \sum_i n_e E_e + RT_0 y_e \ln y_e, \quad (1)$$

где n_e – это количество кмоль элемента e ; E_e – химическая эксергия чистого элемента e в смеси; R – газовая постоянная; y_e – мольная доля вещества.

Тепловая эксергия, подводимая и отводимая от теплообменника с субстратом рассчитывается как:

$$E_{\text{ТО суб}}^{\text{тепл}} = \frac{g_{\text{суб}} \cdot c_{\text{р.с.}} \cdot (T_c - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T_c}{T_0})}{1000}, \quad (2)$$

где T_0 – температура окружающей среды; T_c' и T_c'' – температура субстрата на входе и выходе; $c_{\text{р.с.}}$ и $c_{\text{р.с.}}''$ – теплоемкость субстрата на входе и выходе; $g_{\text{вод}}$ – расход субстрата.

Электроэнергия, тепло и вода необходимы для работы биогазовых установок. На основании информации, полученной из статей [3,4] спрос на электроэнергию для анаэробного процесса сбраживания, включая транспортировку и смешивание сырья у крупных биогазовых установок, в среднем оценивается около 18 кВт·ч. Из технических условий на собственные нужды БГУ-100 расход электроэнергии равен 20 кВт·ч/сут. Коэффициент эксергии электроэнергии принимается равным 1,00. Так 1 кДж электрической энергии представляет собой поток эксергии 1 кДж. Таким образом, эксергия потребления электроэнергии равна 26280 МДж.

На практике при подготовке входной субстрат в резервуаре должен смешиваться с водой. У БГУ-100 при выходе установки на режим навоз разбавляется рекуперативной водой. Так же стоит учесть расход сетевой. Таким образом, расход воды за год составит 205495 м³/год.

Эксергия, подводимая и отводимая от метантенка с водой [4]:

$$E_{\text{вод}}^{\text{тепл}} = g_{\text{вод.}} \cdot c_{\text{р.в.}} \cdot (T_{\text{вод}} - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T_{\text{вод}}}{T_0}), \quad (3)$$

где $T_{\text{вод}}'$ и $T_{\text{вод}}''$ – температура воды на входе и выходе, $g_{\text{вод.}}$ – расход воды.

Рассмотрим газы, образующиеся в процессе анаэробного сбраживания, которые удаляются при очистке биогаза. Биогаз содержит примерно 53-70% метана, 30-40% двуокиси углерода (CO₂) и малые проценты других газов [1]. В данном анализе мы предполагаем, что содержание CH₄ в биогазе составляет 65%, а CO₂ составляет 35% [3]. Для расчета эксергии топлива можно пользоваться иным методом. В этом методе для характеристик эксергии топлива определяются коэффициенты преобразования эксергии. Теоретический потенциал производства биогаза зависит от содержания сухого вещества и вида используемого сырья. В нашем случае принимаем, что из 1 тонны навоза может генерироваться 70 м³ биогаза с содержанием метана 65%. Производство биогаза в год составляет 36500 м³ или 58400 кг, т.к. плотность биогаза 1,6 кг/м³. 65% из биогаза – метан, численно равный 37960 кг. Низшая теплота сгорания для метана 45000 кДж/кг. Его эксергетический коэффициент 0,17. Таким образом, эксергия метана составит 290394 МДж. Шлам, полученный после анаэробного сбраживания, может быть использован в качестве органического удобрения, кормовых добавок из-за наличия в нем питательных веществ, N, Р и К, которые полезны для роста растений [4].

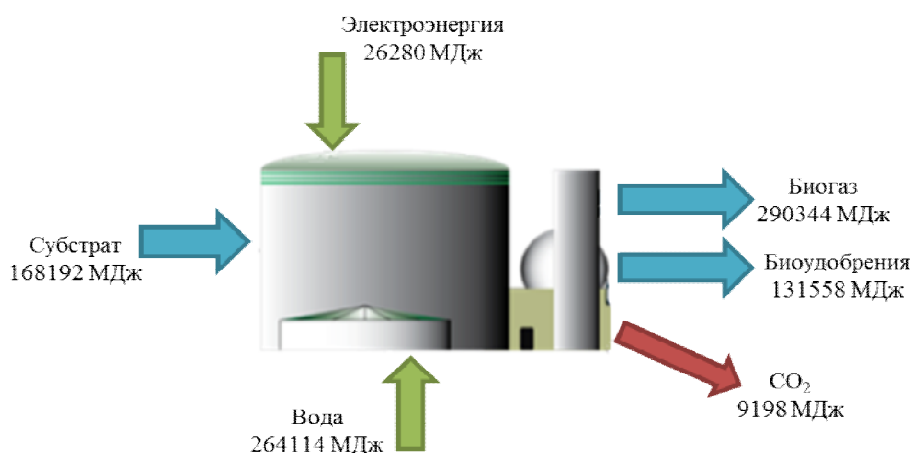


Рис. 2. Схема потоков эксергии биогазовой установки

Общее возможное производство биоудобрений составит около 1880 тонн, а эксергия - 131558 МДж. Диоксид углерода является нежелательным результатом производства биогаза, который составляет 22-45% биогаза, хотя некоторые отрасли промышленности имеют возможности по использованию CO_2 [5]. В данной работе предположим, что 35% от произведенного биогаза - CO_2 . Согласно этому предположению, из производства 58400 кг биогаза, CO_2 составит 20440 кг. Коэффициент химической эксергии 0,4515 кДж/г; поэтому эксергии сгенерированного CO_2 оценивается в 9198 МДж. Если бы углекислый газ использовался в производстве далее, а не просто отпускался в окружающую среду, то мы бы учли его в эксергетическом анализе в полезных продуктах производства, но пока эта эксергия будет рассматриваться в потерях эксергии в системе.

ВЫВОДЫ

Результаты эксергетического анализа процесса производства биогаза отдельно по компонентам показывают, что основной эксергетический вклад вносят субстрат и вода (таблица 2).

Таблица 2.
Результаты эксергетического анализа БГУ

| Эксергия на входе в БГУ | |
|--|------------|
| Субстрат | 168192 МДж |
| Электроэнергия | 26280 МДж |
| Вода | 264114 МДж |
| Итого: | 458586 МДж |
| Эксергия на выходе БГУ | |
| Биогаз | 290344 МДж |
| Биоудобрения | 131558 МДж |
| Итого: | 421902 МДж |
| Результат работы БГУ (относимый к потерям) | |
| CO_2 | 9198 МДж |

При суммировании эксергий конечных продуктов, а именно биогаза и биоудобрений, заметно, что они имеют более высокую эксергию, чем субстрат

на входе в биогазовую установку. Согласно второму закону термодинамики [2], увеличение эксергии конечных продуктов показывает, что эксергетическое качество навоза (168192 МДж) повысилось в результате генерации биогаза (290344 МДж) и биоудобрений (131558 МДж), и составило в общей сложности 421902 МДж. На рисунке 2 показана схема потоков эксергии биогазовой установки. Только результаты комплексного анализа могут говорить о том, что при работе БГУ-100 при всех благоприятных условиях эксергетический коэффициент полезного действия может достигнуть 1. В данной работе не учитывались элементы, которые могут входить в схему работы биогазовой установки, такие как соединительные трубопроводы, перекачивающие и перемешивающие устройства, ДВС, котел-утилизатор. Согласно работам [3-4] эксергетический коэффициент полезного действия данных устройств колеблется от 0,24 до 0,46. При суммировании подводимых и отводимых эксергий схемы целиком, эксергетический коэффициент полезного действия становится более близок к реальности и равен около 0,5-0,6. Такой результат в основном связан с увеличением эксергии конечных продуктов переработки субстрата, улучшением эксергетического качества навоза в процессе сбраживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арбузова Е.В., Щеклеин С.Е. К проблеме энергетической эффективности биогазовых технологии в климатических условиях России // Альтернативная энергетика и экология. 2011. №7. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. – С. 108–110.
2. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
3. Nelson C., Lamb J. Final Report: Haubenschild Farms Anaerobic Digester, The Minnesota Project, August 2002.
4. Werner H. Economic and Environment analysis of a biogas plant, The Royal Veterinary and Agricultural University Denmark, 2004.